

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①① N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 803 950**

②① N° d'enregistrement national : **00 00468**

⑤① Int Cl<sup>7</sup> : H 01 L 31/101, H 01 L 31/0224 // G 01 J 3/00, H 04 B 10/06

①②

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

**A1**

②② Date de dépôt : 14.01.00.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la demande : 20.07.01 Bulletin 01/29.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥① Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑦① Demandeur(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS Etablissement public à caractère scientifique et technologique — FR.

⑦② Inventeur(s) : PARDO FABRICE, COLLIN STEPHANE, TEISSIER ROLAND et PELOUARD JEAN LUC.

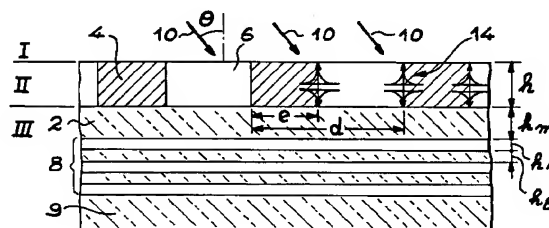
⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : BREVATOME.

⑤④ DISPOSITIF DE PHOTODETECTION A MICRORESONATEUR METAL- SEMICONDUCTEUR VERTICAL ET PROCEDE DE FABRICATION DE CE DISPOSITIF.

⑤⑦ Dispositif de photodétection à microrésonateur métal-semiconducteur vertical et procédé de fabrication de ce dispositif.

Selon l'invention, pour détecter une lumière incidente, on forme, sur une couche isolante (2) n'absorbant pas cette lumière, au moins un élément semiconducteur (6) et au moins deux électrodes (4) encadrant l'élément, l'ensemble élément - électrodes étant apte à absorber cette lumière et dimensionné pour augmenter l'intensité lumineuse par rapport à la lumière incidente, en faisant résonner en particulier un mode de plasmon de surface entre les interfaces de l'ensemble avec la couche et le milieu de propagation de la lumière incidente, la résonance de ce mode ayant lieu à l'interface entre l'élément et au moins l'une des électrodes, ce mode étant excité par la composante du champ magnétique de la lumière, parallèle aux électrodes. Application aux télécommunications optiques.



FR 2 803 950 - A1



**DISPOSITIF DE PHOTODETECTION A MICRORESONATEUR METAL-  
SEMICONDUCTEUR VERTICAL ET PROCEDE DE FABRICATION DE CE  
DISPOSITIF  
DESCRIPTION**

5

Domaine technique

La présente invention concerne un dispositif de photodétection ainsi qu'un procédé de fabrication de ce dispositif.

10

Comme on le verra mieux par la suite, le dispositif objet de l'invention présente une grande sélectivité en longueur d'onde, une extrême rapidité et une grande sensibilité.

Il s'applique à tout domaine susceptible de mettre à profit l'une au moins de ces qualités comme, par exemple, la détection spectroscopique de molécules et, plus particulièrement, les télécommunications optiques à très haut débit, supérieur ou égal à 100 Gbits par seconde.

20

Etat de la technique antérieure

Les photodétecteurs de type MSM (Métal-Semiconducteur-Métal) sont généralement assez simples à fabriquer, s'intègrent facilement à des circuits à transistors à effet de champ (« field effect transistors ») et permettent d'atteindre des vitesses relativement élevées mais au détriment du rendement. On considère ci-après des photodétecteurs MSM connus et leurs inconvénients.

30

Dans un photodétecteur connu à base de InGaAs, dont la distance inter-électrodes vaut 1  $\mu\text{m}$ , le temps

de transit des trous est de l'ordre de 10 ps, ce qui correspond à une fréquence de coupure de moins de 20 GHz. Il faut donc diminuer la distance inter-électrodes pour diminuer le temps de transit des trous.

5 Lorsque la distance des électrodes tombe en-dessous de 0,1  $\mu\text{m}$ , le transport ne peut plus être considéré comme stationnaire. Le temps de transit devient alors très inférieur à 1 ps.

Le masquage de la zone active par les

10 électrodes est l'un des principaux inconvénients des structures MSM connues et limite leur rendement quantique. De plus, à cause de l'absorption limitée des matériaux utilisés dans ces structures (la longueur d'absorption est supérieure à 1  $\mu\text{m}$ ), il faut limiter

15 l'épaisseur de la zone d'absorption pour éviter de créer des porteurs de charge loin des électrodes. L'efficacité quantique des photodétecteurs connus, ayant un intervalle inter-électrodes inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ , est donc extrêmement mauvaise.

20 Inversement, les structures MSM connues, dont le rendement quantique externe est bon, ont une vitesse faible.

Mais un photodétecteur ultrarapide (dont le temps de réponse est inférieur à 1 ps) est aujourd'hui

25 un élément crucial pour les télécommunications optiques à très haut débit (100 Gbits/s et au-delà). Les performances recherchées sont une grande sensibilité et une large bande passante, aux longueurs d'onde de 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ . Quel que soit le type de

30 photodétecteur (diode P(I)N ou structure Métal-Semiconducteur-Métal), l'objectif de grande vitesse

impose que la distance inter-électrodes soit courte (inférieure à 100 nm) et que la lumière à détecter soit absorbée dans un volume minimal.

Ainsi, le semiconducteur InGaAs massif ("bulk")  
5 a une longueur caractéristique d'absorption d'environ 3  $\mu\text{m}$  à la longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$ .

Dans les diodes PIN et dans les structures MSM, la diminution du temps de transit des porteurs de charge est directement liée à une diminution du  
10 rendement quantique externe.

La conception des photodétecteurs connus fait donc nécessairement l'objet d'un compromis entre rendement et vitesse.

#### 15 Exposé de l'invention

Le dispositif objet de l'invention vise à remettre radicalement en cause ce compromis et utilise pour ce faire un micro-résonateur vertical, ce qui permet, par exemple, d'obtenir un rendement quantique  
20 au-delà de 70% dans une structure de faible capacité, dont l'intervalle inter-électrodes peut être inférieur à 50 nm et conduire à une bande passante supérieure à 1 THz.

Le principe d'un dispositif conforme à  
25 l'invention consiste à concentrer de façon résonnante la lumière que l'on veut détecter, dans une structure de type MSM de faible volume, en utilisant la décroissance rapide d'ondes évanescentes excitées à l'interface Métal/Semiconducteur.

30 Les modes de plasmons de surface permettent d'atteindre cet objectif.

Contrairement aux structures connues, les plasmons ne se propagent pas horizontalement (c'est-à-dire parallèlement au substrat de la structure) mais restent confinés le long de la surface verticale des électrodes de la structure.

De façon précise, la présente invention a pour objet un dispositif de photodétection destiné à détecter une lumière incidente de longueur d'onde prédéfinie, se propageant dans un milieu de propagation, ce dispositif étant caractérisé en ce qu'il comprend une couche électriquement isolante qui n'absorbe pas cette lumière et, sur cette couche, au moins un élément, comprenant un matériau semiconducteur, et au moins deux électrodes de polarisation, destinées à être respectivement portées à des potentiels différents l'un de l'autre, les électrodes encadrant l'élément, l'ensemble formé par l'élément et les électrodes étant apte à absorber la lumière incidente (autrement dit l'élément et/ou les électrodes sont aptes à absorber cette lumière), l'élément et les électrodes ayant une forme sensiblement parallélépipédique et s'étendant suivant une même direction, les dimensions des électrodes et de l'élément, comptées transversalement à cette direction, étant choisies, en fonction de la longueur d'onde prédéfinie, de façon à augmenter l'intensité lumineuse dans l'ensemble formé par l'élément et les électrodes, par rapport à la lumière incidente, en faisant résonner au moins l'un de deux modes, à savoir un premier mode qui est un mode de plasmon de surface et que l'on fait résonner entre les interfaces que présente cet ensemble

avec la couche isolante et le milieu de propagation, la résonance de ce premier mode ayant lieu à l'interface entre l'élément et au moins l'une des électrodes, ce premier mode étant excité par la composante du champ magnétique associé à la lumière incidente, composante qui est parallèle aux électrodes, et un deuxième mode qui est un mode transverse électrique d'un guide d'onde optique qui est perpendiculaire à la couche isolante et comprend les deux électrodes, ce deuxième mode étant excité par la composante du champ électrique associé à la lumière incidente, composante qui est parallèle aux électrodes.

De préférence lorsque l'on fait résonner le mode de plasmon de surface, la largeur de chaque élément, comptée perpendiculairement à la direction des électrodes, est inférieure à  $\lambda$  et supérieure à  $0,02 \times \lambda$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière incidente, et l'épaisseur de chaque élément est inférieure à  $\lambda / (2n)$  où  $n$  est l'indice de réfraction moyen de chaque élément.

Selon un premier mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention, les électrodes sont faites d'un même matériau électriquement conducteur et ont la même hauteur, comptée perpendiculairement à la couche isolante.

Selon un deuxième mode de réalisation particulier, les électrodes ont l'une au moins des deux propriétés (a) d'être faites de matériaux électriquement conducteurs différents et (b) d'avoir des hauteurs différentes, comptées perpendiculairement à la couche isolante, de manière que la résonance ait

lieu essentiellement du côté de l'électrode qui recueille les porteurs de charge lents lors de la polarisation des électrodes.

L'élément que comporte le dispositif peut être  
5 une hétérostructure.

Selon un mode de réalisation particulier, le dispositif objet de l'invention comprend plusieurs éléments et électrodes qui alternent sur la couche isolante, chaque électrode étant faite d'un seul métal  
10 ou de deux métaux différents.

Dans ce cas, dans un premier mode de mise en oeuvre particulier, les électrodes sont destinées à être portées à des potentiels qui vont en croissant d'une électrode d'extrémité à l'autre électrode  
15 d'extrémité de l'ensemble des électrodes.

Le dispositif objet de l'invention peut alors comprendre en outre un matériau résistif, stabilisateur de potentiels, qui est en contact avec les électrodes et va d'une électrode d'extrémité à l'autre électrode  
20 d'extrémité de l'ensemble des électrodes. Cela permet de polariser sous forte tension l'ensemble des éléments.

Dans un deuxième mode de mise en oeuvre particulier, les électrodes sont destinées à être  
25 portées à des potentiels dont les valeurs absolues sont égales et les signes alternent.

Selon un mode de réalisation préféré du dispositif objet de l'invention, ce dispositif comprend en outre un moyen de réflexion prévu pour réfléchir la  
30 lumière non absorbée, traversant la couche isolante, l'épaisseur de cette couche isolante étant choisie pour

que la lumière réfléchiée par le moyen de réflexion soit en phase avec les ondes lumineuses présentes dans l'ensemble formé par chaque élément et les électrodes et participe à la résonance.

5            Dans un premier exemple, le dispositif objet de l'invention est destiné à détecter une lumière incidente dont la longueur d'onde vaut approximativement  $0,8 \mu\text{m}$ , ce dispositif est formé sur un substrat de GaAs, l'élément est en GaAs, les  
10 électrodes en Ag, la couche isolante en AlAs et le moyen de réflexion est un miroir multicouche AlAs/AlGaAs.

          Dans un deuxième exemple, le dispositif est destiné à détecter une lumière incidente dont la  
15 longueur d'onde vaut approximativement  $1,55 \mu\text{m}$ , ce dispositif est formé sur un substrat en InP, l'élément est en InGaAs, les électrodes en Ag, la couche isolante en AlInAs et le moyen de réflexion est un miroir multicouche GaInAsP/InP ou AlGaInAs/AlInAs. En  
20 variante, le dispositif est formé sur un substrat en GaAs, l'élément étant en alliage InGaAsNSb, les électrodes en Ag, la couche isolante en AlAs et le moyen de réflexion étant un miroir multicouche GaAs/AlAs.

25            Dans un troisième exemple, le dispositif est destiné à détecter une lumière incidente dont la longueur d'onde appartient au domaine infrarouge, et les électrodes sont essentiellement en Ag ou Au pour absorber la lumière incidente, l'élément n'absorbant  
30 pas cette lumière incidente.



Selon un premier mode de réalisation particulier de l'invention, le milieu de propagation est l'air.

5 Selon un deuxième mode de réalisation particulier, le milieu de propagation est un guide de lumière parallèle à la direction suivant laquelle s'étendent les électrodes de chaque élément.

La présente invention concerne aussi un procédé de fabrication du dispositif objet de l'invention, dans  
10 lequel on fait croître une épaisseur déterminée du matériau semiconducteur de l'élément sur la couche isolante, on grave sélectivement ce matériau semiconducteur pour en éliminer des portions aux emplacements correspondant aux électrodes et on forme  
15 ces électrodes à ces emplacements.

Selon un premier mode de mise en oeuvre particulier du procédé objet de l'invention, on utilise un même masque pour graver sélectivement le matériau semiconducteur puis former les électrodes.

20 Selon un deuxième mode de mise en oeuvre particulier, on utilise un masque pour graver sélectivement le matériau semiconducteur, on enlève ce masque, on forme les électrodes au moyen d'au moins un métal et l'on enlève l'excédent de ce métal au moyen  
25 d'un polissage mécanique ou mécano-chimique.

Pour former les électrodes, on peut aussi utiliser deux métaux que l'on dépose successivement de façon oblique par rapport à la couche isolante.

Il convient de noter que, dans la présente  
30 invention, l'utilisation d'un grand nombre d'éléments entre lesquels sont disposées des électrodes, au lieu

de l'utilisation d'un seul élément compris entre deux électrodes, permet de construire un réseau dont la modélisation électromagnétique est beaucoup plus simple.

5           On peut alors montrer que l'on fait résonner le premier mode, qui correspond à des plasmons verticaux, faiblement couplés deux à deux.

          Les extrémités inférieures et supérieures des faces verticales des électrodes ont un effet de miroir  
10 sur des plasmons d'interface métal-semiconducteur, ce qui permet d'établir une résonance de type Fabry-Pérot et d'absorber ainsi la plus grande partie de l'onde incidente polarisée TM (transverse magnétique).

          La modélisation a également permis de mettre en  
15 évidence le même phénomène de résonance de type Fabry-Pérot pour les modes TE (transverse électrique) du guide d'onde plan formé entre deux électrodes séparées par un élément et d'absorber ainsi la plus grande partie de la lumière incidente polarisée TE pour des  
20 paramètres du dispositif convenablement choisis.

          Dans le cas de la polarisation TM comme dans le cas de la polarisation TE, l'absorption totale peut être obtenue en utilisant un miroir de Bragg sous les électrodes pour réfléchir l'onde transmise dans la  
25 couche isolante.

          Les figures des dessins annexés montrent que, contrairement à l'excitation de plasmons de surface horizontaux (c'est-à-dire parallèles à la couche isolante), la résonance est peu sensible à  
30 l'inclinaison de l'onde lumineuse incidente que l'on veut détecter. Il est donc possible de focaliser

fortement cette onde lumineuse sur le dispositif et de ne mettre en oeuvre qu'un petit nombre d'éléments (par exemple 3 à 5), tout en diminuant très peu le rendement quantique du dispositif (par rapport au cas où l'on  
5 utilise un grand nombre d'éléments).

De plus, dans le cas de la polarisation TM, il convient de réaliser avec précision l'épaisseur de chaque élément alors que ce n'est pas le cas pour les dimensions transversales de chaque élément et des  
10 électrodes.

#### Brève description des dessins

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation  
15 donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en perspective schématique et partielle d'un dispositif conforme à  
20 l'invention,

- les figures 2 et 3 sont des vues en coupe schématiques et partielles d'autres dispositifs conformes à l'invention,

- la figure 4 montre les variations du taux de  
25 réflexion en fonction de l'angle d'incidence de la lumière à détecter, pour deux valeurs différentes de la hauteur du réseau formé par les éléments et les électrodes d'un dispositif conforme à l'invention,

- la figure 5 montre les variations du taux de  
30 réflexion en fonction de cette hauteur, dans un dispositif conforme à l'invention,

- les figures 6A à 6E illustrent schématiquement des étapes d'un procédé de fabrication d'un dispositif conforme à l'invention,

- les figures 6F à 6H illustrent schématiquement des variantes de ce procédé, et

- la figure 7 est une vue en perspective schématique d'un autre dispositif conforme à l'invention.

#### 10 Exposé détaillé de modes de réalisation particuliers

Un dispositif conforme à l'invention est vu en perspective schématique et partielle sur la figure 1. Il s'agit d'une structure formant un réseau de détecteurs métal-semiconducteur-métal, également noté  
15 MSM, qui est disposé sur une couche électriquement isolante 2.

Ce réseau est un ensemble d'électrodes métalliques 4 qui alternent avec des éléments semiconducteurs 6.

20 Ces électrodes et ces éléments ont une forme approximativement parallélépipédique et s'étendent suivant une même direction D sur la couche 2.

Dans l'exemple de la figure 1, il y a plusieurs éléments semiconducteurs. Dans une variante non  
25 représentée, on utilise un seul élément semiconducteur 6 compris entre deux électrodes 4.

Un autre dispositif conforme à l'invention est vu en coupe transversale schématique et partielle sur la figure 2. Ce dispositif de la figure 2 est identique  
30 à celui de la figure 1 à ceci près qu'il comprend en

outre un miroir multicouche 8 également appelé miroir de Bragg.

Ce miroir multicouche est un empilement alterné de couches de matériaux n'absorbant pas la lumière, d'indices de réfraction différents  $n_A$  et  $n_B$ . Les épaisseurs respectives  $h_A$  et  $h_B$  de ces couches sont calculées en fonction de la gamme de longueurs d'onde à réfléchir.

On voit aussi que le dispositif de la figure 2 est formé sur un substrat 9. Le miroir 8 est compris entre ce substrat et la couche 2.

On peut décomposer le dispositif de la figure 2 (et donc le dispositif de la figure 1) en trois zones I, II et III.

Dans ce qui suit, on suppose que l'onde lumineuse incidente 10 que l'on veut détecter avec le dispositif arrive sur ce dernier par la zone I constituée par de l'air.

On peut décrire de manière similaire le cas d'un dispositif conforme à l'invention placé au contact d'un guide d'onde lumineuse dans lequel se propage une lumière à détecter avec le dispositif. Ce cas est illustré de façon schématique et partielle sur la figure 3 où le guide a la référence 12. Ce guide 12 s'étend suivant la direction D et donc parallèlement aux électrodes 4 et aux éléments semiconducteurs 6.

En revenant à la figure 2, la zone II est composée du réseau des électrodes métallique 4 à section transversale approximativement rectangulaire et des éléments 6 faits d'un semiconducteur qui absorbe la

lumière incidente, la longueur d'onde de cette lumière étant connue.

La zone III correspond à la couche 2 qui est composée d'un semiconducteur non absorbant, en accord  
5 de maille avec le semiconducteur de la zone II. Cette zone III peut, comme on l'a vu, inclure un miroir de Bragg qui réfléchit les ondes lumineuses transmises depuis la zone II jusque dans la zone III.

La lumière incidente à détecter 10, que l'on peut décomposer en lumière polarisée TM et en lumière polarisée TE, arrive sur la structure par la zone I. La lumière polarisée TM excite les modes de plasmons de surface le long de l'interface entre le métal et le semiconducteur de la zone II. Les ondes correspondant à  
15 ces modes sont alors réfléchies aux interfaces des zones II/III et II/I.

Ce phénomène de résonance pour une polarisation TM est schématisé sur la figure 2 où l'on a symbolisé les plasmons de surface résonants 14.

La hauteur  $h_m$  entre l'interface II/III et le  
20 miroir de Bragg 8 est calculée de manière à ce que l'onde transmise de la zone II à la zone III et réfléchi par ce miroir 8 se retrouve en phase avec les ondes (plasmons) dans le milieu II et participe à la  
25 résonance.

La lumière polarisée TE excite les modes du guide d'onde plan entre deux électrodes 4. Ces modes se réfléchissent également aux interfaces II/III et II/I et les ondes transmises dans la zone III sont  
30 réfléchies par le miroir de Bragg 8.

Le fonctionnement du dispositif est ensuite similaire à celui d'une structure MSM classique :

Des potentiels sont respectivement appliqués aux électrodes (par des moyens de polarisation non représentés) ; ces potentiels peuvent aller en croissant d'une électrode à la suivante (polarisation de manière progressive) ou ces potentiels peuvent être égaux en valeur absolue mais avoir des signes qui alternent en passant d'une électrode à l'autre.

10 Dans le semiconducteur de la zone II, l'absorption de la lumière se traduit par la création d'une paire électron-trou pour chaque photon absorbé (dont l'énergie est supérieure à la largeur de bande interdite, ou « gap », du semiconducteur). Sous l'effet  
15 du champ électrique, l'électron est alors attiré par celle des deux électrodes les plus proches de cet électron, qui a le potentiel le plus élevé et le trou par celle de ces deux électrodes qui a le potentiel le moins élevé. Ce mouvement des charges crée un courant  
20 électrique dans les électrodes.

La rapidité de la réponse du photodétecteur dépend des distances entre les électrodes et des potentiels auxquels ces électrodes sont portées.

Notons qu'une partie de l'onde incidente peut  
25 être absorbée dans le métal dont sont faites les électrodes. Cette absorption participe partiellement à la création de porteurs dans les éléments semiconducteurs 6 : les électrons excités peuvent passer au-dessus de la barrière de potentiel ou bien  
30 passer par effet tunnel.

Les différents matériaux (métal des électrodes, semiconducteurs absorbant et non absorbant) sont choisis en fonction de la longueur d'onde de l'onde incidente à absorber. Par exemple, les électrodes  
5 métalliques peuvent être en argent, métal dont le coefficient de réflexion (pour l'Ag massif) est élevé et qui permet donc d'obtenir une forte résonance. L'or, le platine, l'aluminium ou tout autre métal fortement réfléchissant peut être également utilisé. Notons aussi  
10 que les électrodes peuvent être constituées de deux métaux, pour des raisons que l'on verra plus loin.

Pour une absorption autour de  $0,8\text{ }\mu\text{m}$ , on choisit GaAs comme semiconducteur absorbant et AlAs comme semiconducteur non absorbant et le miroir de  
15 Bragg est formé de AlAs et de  $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ . Pour une absorption autour de  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ , on choisit  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  comme semiconducteur absorbant et InP comme semiconducteur non absorbant et le miroir de Bragg est formé de GaInAsP/InP ou de AlGaInAs/AlInAs.

20 D'autre part, les différents paramètres du dispositif  $e$  (largeur des électrodes),  $d$  (pas du réseau) et  $h$  (hauteur du réseau, c'est-à-dire épaisseur des électrodes et des éléments semiconducteurs) ainsi que l'épaisseur  $h_m$  de la couche isolante 2 - voir la  
25 figure 2 - sont ajustés de manière à exciter soit les plasmons de surface pour la polarisation TM, soit les modes TE, et de manière à obtenir la résonance de Fabry-Pérot pour ces modes. Il est également possible de choisir ces paramètres de façon à exciter de manière  
30 optimale les deux types de modes simultanément.



On précise que, de préférence, la distance  $d$  entre deux électrodes adjacentes (c'est-à-dire la largeur de chaque élément) est comprise entre  $\lambda$  et  $0,02 \times \lambda$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière à détecter et que  $h$  est inférieur à  $\lambda/(2n)$  où  $n$  est l'indice de réfraction moyen des éléments 6. On obtient ainsi un dispositif à faible temps de transit et faible capacité.

A titre d'exemple, on peut utiliser un nombre  $N$  d'éléments, avec  $2 \leq N \leq 20$ , le pas  $d$  étant compris entre  $0,1 \times \lambda$  et  $1 \times \lambda$ .

A  $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$  et avec les matériaux donnés ci-dessus, on obtient une absorption totale (supérieure à 99%) de l'onde incidente polarisée TM en choisissant un pas du réseau de  $d = 150 \text{ nm}$ , un taux de recouvrement ( $r = e/d$ ) de  $r = 0,5$  (50%), une hauteur  $h$  du réseau de 55 nm et un miroir de Bragg composé de 20 couches. L'énergie absorbée par le semiconducteur de la zone II est de l'ordre de 74%, le reste (26%) étant absorbé par le métal.

L'onde incidente polarisée TE est également absorbée totalement en choisissant  $d = 150 \text{ nm}$ ,  $r = 0,4$  et  $h = 305 \text{ nm}$ . Pour une onde non polarisée, le choix des paramètres  $d = 150 \text{ nm}$ ,  $r = 0,5$  et  $h = 210 \text{ nm}$  permet d'obtenir une réflexion de l'onde incidente de 16% et une absorption dans le semiconducteur de l'ordre de 72%.

Les courbes des figures 4 et 5 permettent de caractériser les performances de dispositifs conformes à l'invention.

La figure 4 montre les variations du taux de réflexion  $T$  (en %), rapport de l'intensité lumineuse

réfléchi par le dispositif à l'intensité lumineuse incidente sur ce dispositif, en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  (en radians) que l'on voit sur la figure 2, pour les valeurs suivantes des paramètres :  
5  $d=0,15 \mu\text{m}$ ,  $r=0,5$  et  $h=53 \text{ nm}$  pour la courbe I tandis que  $h=55 \text{ nm}$  pour la courbe II.

La figure 5 montre les variations du taux de réflexion  $T$  (en %) en fonction de la hauteur  $h$  du réseau (en  $\mu\text{m}$ ) pour  $d=0,15 \mu\text{m}$ ,  $r=0,5$  et  $\theta=0^\circ$  (incidence  
10 normale).

La fabrication d'un dispositif conforme à l'invention, par exemple le dispositif de la figure 2, se fait en cinq étapes qui sont schématisées sur les figures 6A à 6E.

15 Les couches 16 et 18 du miroir de Bragg, la couche 2 en AlAs et la couche 22 en GaAs qui surmonte la couche 2 (figure 6A) sont réalisées par épitaxie (par exemple par épitaxie par jet moléculaire) sur un substrat 9 de GaAs puis on effectue un masquage  
20 électronique des motifs du réseau (figure 6B). On définit ainsi, grâce à des dépôts 24 de masquage (par exemple des dépôts de PMMA), les zones correspondant aux électrodes. On réalise ensuite une gravure ionique réactive de la couche de GaAs (figure 6C). Enfin, on  
25 effectue (figure 6D) un dépôt sous vide d'une couche 25 d'argent pour former les électrodes 4 puis un pelage ("lift off") qui conduit à la structure de la figure 6E.

La gravure sélective de la couche de GaAs sur  
30 AlAs est obtenue grâce à l'introduction d'oxygène dans le bâti où a lieu la fabrication : lorsque le GaAs est

gravé, une fine couche d'oxyde se forme à la surface de la couche de AlAs, diminue considérablement la vitesse de gravure et permet d'arrêter la gravure sur cette couche. Cette sélectivité est généralisable, par exemple pour InGaAs, en introduisant une couche de InAlAs.

La valeur du paramètre  $h$  (figure 2), dont le rôle est crucial dans la résonance, est donc maîtrisée au moment de l'épitaxie, à la monocouche près (0,5 nm).

L'étape de métallisation et de lift-off peut être remplacée, après avoir ôté les dépôts (voir figure 6F), par une métallisation et un damasquinage ("damascene") c'est-à-dire un polissage mécanique ou mécano-chimique du métal respectant les éléments semi-conducteurs 6. La flèche F de la figure 6F représente la limite de ce polissage.

Dans ce dernier cas, deux métallisations 25a et 25b (voir figures 6G et 6H) avec des sources inclinées par rapport au substrat et mettant en jeu deux métaux différents, permettent de construire des électrodes bimétalliques (cas de la figure 7).

Le dispositif objet de l'invention peut être adapté à une grande plage de longueurs d'ondes, allant du visible à l'infrarouge (plusieurs  $\mu\text{m}$ ). D'autre part, il peut être réalisé avec une large gamme de matériaux semiconducteurs.

Il est possible d'utiliser différents types de semiconducteurs dans la zone II (figure 2), par exemple sous forme d'hétérostructures (couches épitaxiées) pour améliorer le transport des charges et donc la rapidité du dispositif.

Les calculs ont montré qu'une section des électrodes trapézoïdale ou partiellement arrondie ne changeait pas fondamentalement le fonctionnement du dispositif. En revanche, la hauteur  $h$  des éléments joue  
5 un rôle important.

Il est également possible d'utiliser des électrodes dissymétriques afin de favoriser la résonance sur l'électrode la plus négative et de réduire ainsi le trajet des porteurs de charge lents  
10 (les trous dans l'exemple considéré) par rapport au trajet des porteurs de charge rapides (les électrons).

Comme on l'a vu, il est possible d'utiliser deux métaux différents pour les électrodes, avec deux objectifs indépendants. L'un est semblable au précédent  
15 et vise à favoriser la résonance sur l'électrode la plus négative tandis que l'autre vise à optimiser les hauteurs de barrière pour chacun des deux types de porteurs et donc à réduire le courant d'obscurité.

La création de porteurs dans le métal peut  
20 avoir lieu pour des photons d'énergie inférieure à la largeur de bande interdite du semiconducteur des éléments 6 (longueur d'onde plus grande), ce qui élargit le domaine des applications de l'invention.

Un autre dispositif conforme à l'invention est  
25 schématiquement représenté en perspective sur la figure 7. On voit encore la couche isolante et le miroir de Bragg 8.

On voit aussi les éléments 6 séparés par des électrodes qui, dans l'exemple considéré, sont chacune  
30 en deux parties adjacentes 26 et 28, respectivement faites de deux métaux différents. On voit qu'un élément

6 est alors compris entre une partie 26 et une partie 28 et donc entre deux métaux différents.

Sur la figure 7, les références 30 et 31  
représentent des résidus de la couche 22, aux deux  
5 extrémités du dispositif.

On voit aussi un contact de cathode 32 et un  
contact d'anode 34 qui sont respectivement en contact  
avec les électrodes d'extrémité. Ce contact d'anode et  
ce contact de cathode sont reliés l'un à l'autre par  
10 l'intermédiaire d'un élément résistif 36 qui est en  
contact avec chaque électrode et permet de stabiliser  
les potentiels de ces électrodes.

Pour le fonctionnement du dispositif de la  
figure 7, une tension est appliquée entre les contacts  
15 32 et 34.

**REVENDECATIONS**

1. Dispositif de photodétection destiné à détecter une lumière incidente (10) de longueur d'onde prédéfinie, se propageant dans un milieu de propagation (1, 12), ce dispositif étant caractérisé en ce qu'il comprend une couche électriquement isolante (2) qui n'absorbe pas cette lumière et, sur cette couche, au moins un élément (6), comprenant un matériau semiconducteur, et au moins deux électrodes de polarisation (4), destinées à être respectivement portées à des potentiels différents l'un de l'autre, les électrodes encadrant l'élément, l'ensemble formé par l'élément et les électrodes étant apte à absorber la lumière incidente, l'élément et les électrodes ayant une forme sensiblement parallélépipédique et s'étendant suivant une même direction (D), les dimensions des électrodes et de l'élément, comptées transversalement à cette direction, étant choisies, en fonction de la longueur d'onde prédéfinie, de façon à augmenter l'intensité lumineuse dans l'ensemble formé par l'élément et les électrodes, par rapport à la lumière incidente, en faisant résonner au moins l'un de deux modes, à savoir un premier mode qui est un mode de plasmon de surface et que l'on fait résonner entre les interfaces que présente cet ensemble avec la couche isolante et le milieu de propagation, la résonance de ce premier mode ayant lieu à l'interface entre l'élément et au moins l'une des électrodes, ce premier mode étant excité par la composante du champ magnétique associé à la lumière incidente, composante qui est parallèle aux électrodes, et un deuxième mode qui est

un mode transverse électrique d'un guide d'onde optique qui est perpendiculaire à la couche isolante et comprend les deux électrodes, ce deuxième mode étant excité par la composante du champ électrique associé à la lumière incidente, composante qui est parallèle aux électrodes.

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel on fait résonner le mode de plasmon de surface et dans lequel la largeur (d-e) de chaque élément, comptée perpendiculairement à la direction (D), est inférieure à  $\lambda$  et supérieure à  $0,02 \times \lambda$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière incidente, et l'épaisseur (h) de chaque élément est inférieure à  $\lambda/(2n)$  où n est l'indice de réfraction moyen de chaque élément.

3. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel les électrodes (4) sont faites d'un même matériau électriquement conducteur et ont la même hauteur, comptée perpendiculairement à la couche isolante.

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel les électrodes ont l'une au moins des deux propriétés (a) d'être faites de matériaux électriquement conducteurs différents et (b) d'avoir des hauteurs différentes, comptées perpendiculairement à la couche isolante, de manière que la résonance ait lieu essentiellement du côté de l'électrode qui recueille les porteurs de charge lents lors de la polarisation des électrodes.

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'élément est une hétérostructure.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, comprenant plusieurs éléments et électrodes qui alternent sur la couche isolante, chaque électrode étant faite d'un seul métal ou de deux métaux  
5 différents.

7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel les électrodes sont destinées à être portées à des potentiels qui vont en croissant d'une électrode d'extrémité à l'autre électrode d'extrémité de  
10 l'ensemble des électrodes.

8. Dispositif selon la revendication 7, comprenant en outre un matériau résistif (36), stabilisateur de potentiels, qui est en contact avec les électrodes et va d'une électrode d'extrémité à  
15 l'autre électrode d'extrémité de l'ensemble des électrodes.

9. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel les électrodes sont destinées à être portées à des potentiels dont les valeurs absolues sont égales et  
20 les signes alternent.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, comprenant en outre un moyen de réflexion (8) prévu pour réfléchir la lumière non absorbée, traversant la couche isolante, l'épaisseur  
25 ( $h_m$ ) de cette couche isolante étant choisie pour que la lumière réfléchie par le moyen de réflexion (8) soit en phase avec les ondes lumineuses présentes dans l'ensemble formé par chaque élément et les électrodes et participe à la résonance.

30 11. Dispositif selon la revendication 10, destiné à détecter une lumière incidente dont la



longueur d'onde vaut approximativement  $0,8\text{ }\mu\text{m}$ , ce dispositif étant formé sur un substrat de GaAs, l'élément (6) étant en GaAs, les électrodes en Ag, la couche isolante en AlAs et le moyen de réflexion étant  
5 un miroir multicouche AlAs/AlGaAs.

12. Dispositif selon la revendication 10, destiné à détecter une lumière incidente dont la longueur d'onde vaut approximativement  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ , ce dispositif étant formé sur un substrat en InP,  
10 l'élément étant en InGaAs, les électrodes en Ag, la couche isolante en AlInAs et le moyen de réflexion étant un miroir multicouche GaInAsP/InP ou AlGaInAs/AlInAs.

13. Dispositif selon la revendication 10, destiné à détecter une lumière incidente dont la longueur d'onde vaut approximativement  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ , ce dispositif étant formé sur un substrat en GaAs, l'élément étant en alliage InGaAsNSb, les électrodes en Ag, la couche isolante en AlAs et le moyen de réflexion  
15 étant un miroir multicouche GaAs/AlAs.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, destiné à détecter une lumière incidente dont la longueur d'onde appartient au domaine infrarouge, dans lequel les électrodes sont  
25 essentiellement en Ag ou Au pour absorber la lumière incidente, l'élément n'absorbant pas cette lumière incidente.

15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, dans lequel le milieu de propagation est l'air (I).  
30

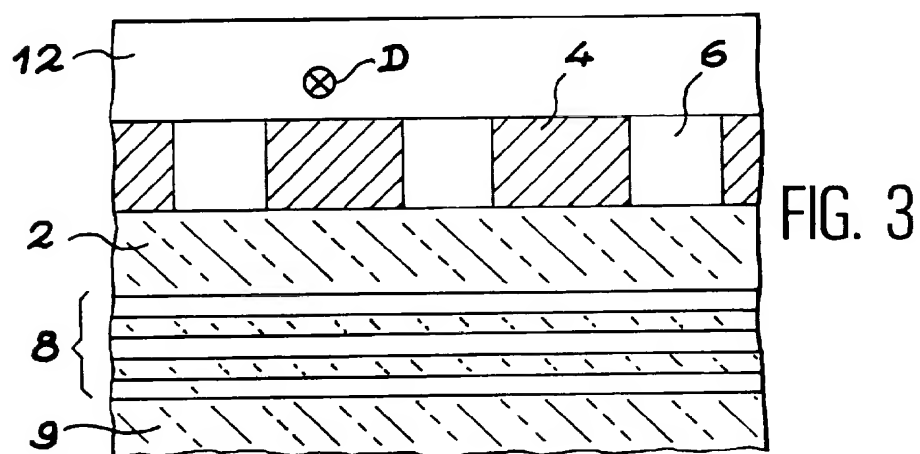
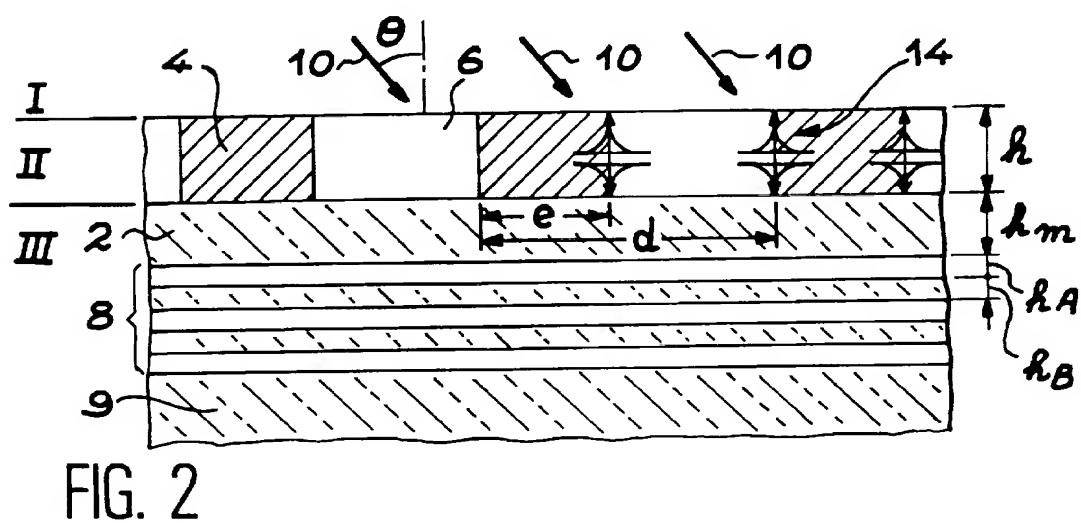
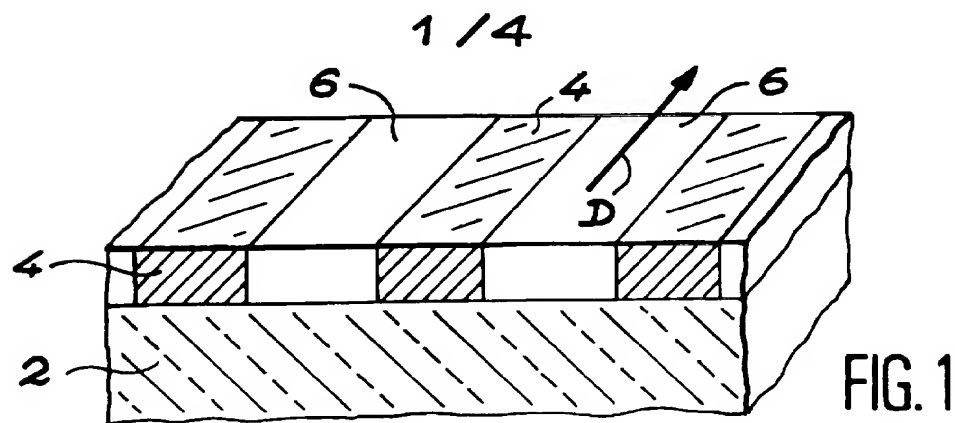
16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, dans lequel le milieu de propagation est un guide de lumière (12) parallèle à la direction (D) suivant laquelle s'étendent les électrodes de chaque élément.

17. Procédé de fabrication du dispositif de photodétection selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel on fait croître une épaisseur déterminée du matériau semiconducteur de l'élément sur la couche isolante (2), on grave sélectivement ce matériau semiconducteur pour en éliminer des portions aux emplacements correspondant aux électrodes (4) et on forme ces électrodes à ces emplacements.

18. Procédé selon la revendication 17, dans lequel on utilise un même masque pour graver sélectivement le matériau semiconducteur puis former les électrodes (4).

19. Procédé selon la revendication 17, dans lequel on utilise un masque pour graver sélectivement le matériau semiconducteur, on enlève ce masque, on forme les électrodes (4) au moyen d'au moins un métal et l'on enlève l'excédent de ce métal au moyen d'un polissage mécanique ou mécano-chimique.

20. Procédé selon la revendication 19, dans lequel, pour former les électrodes, on utilise deux métaux que l'on dépose successivement de façon oblique par rapport à la couche isolante (2).



2/4

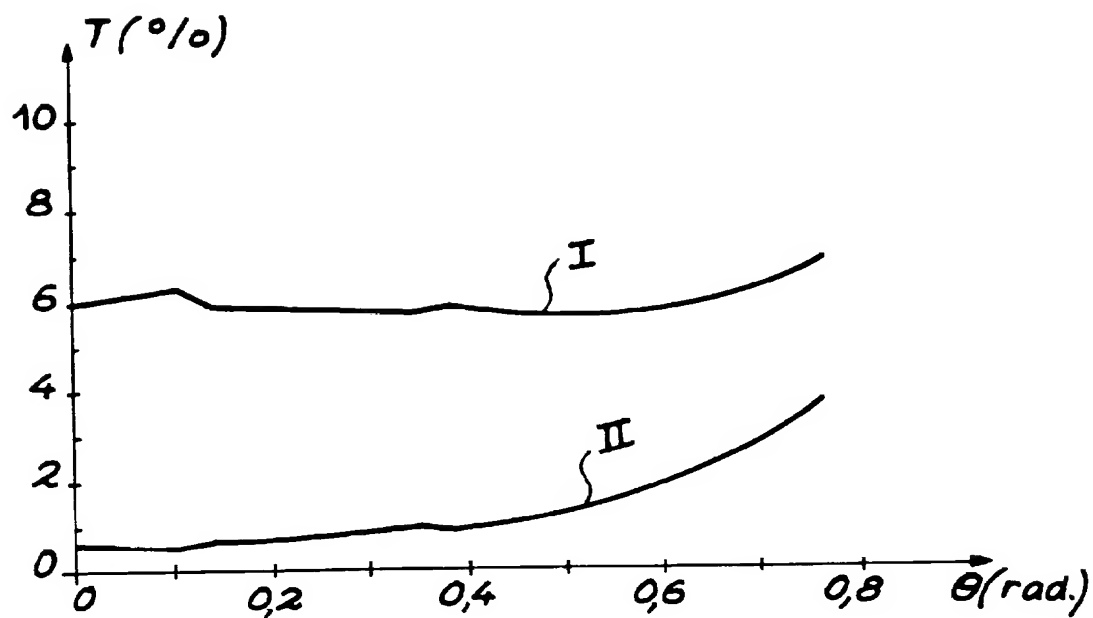


FIG. 4

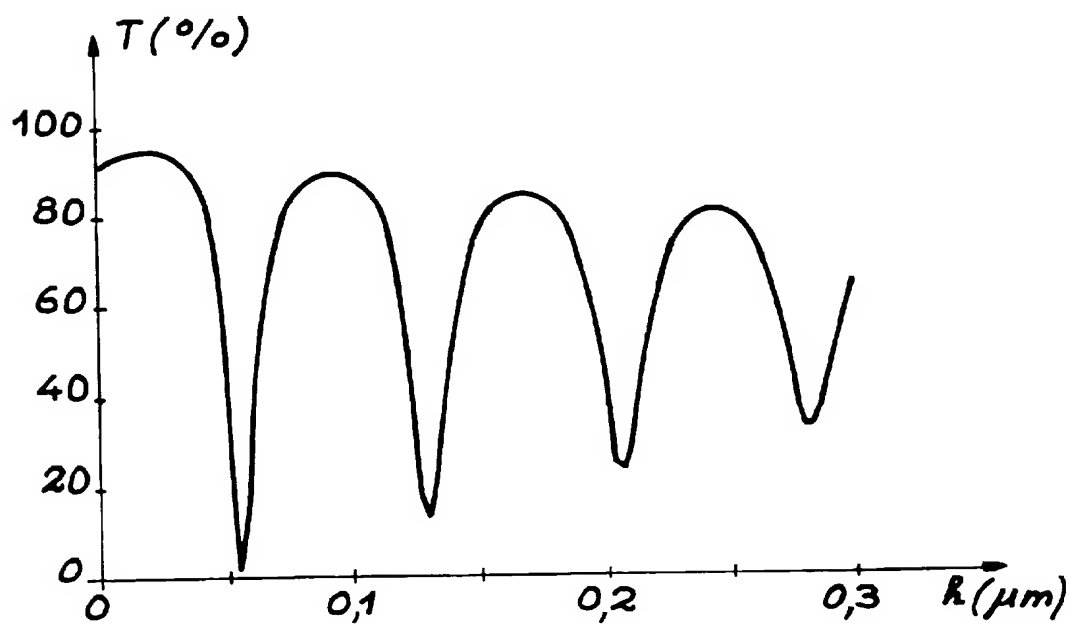


FIG. 5

3 / 4

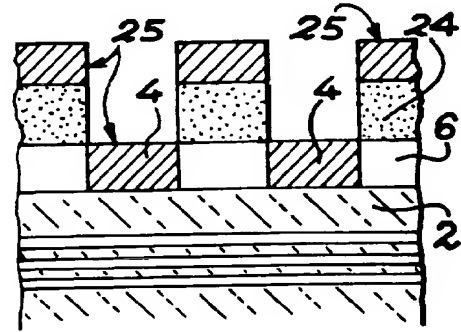
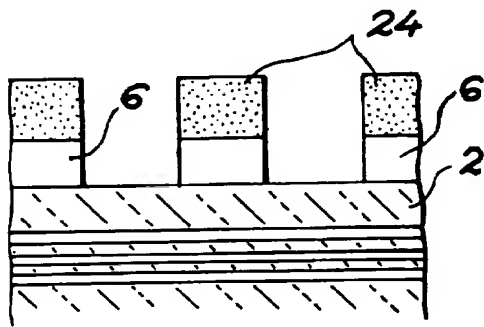
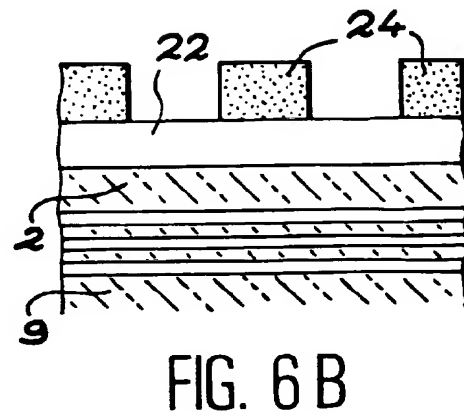
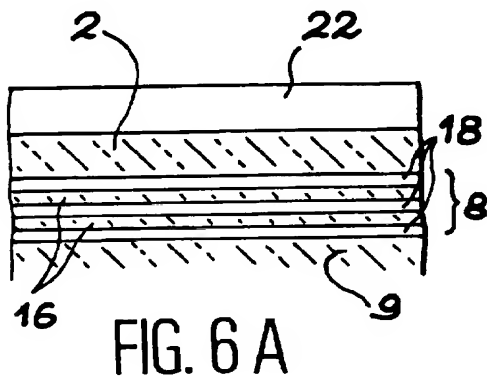


FIG. 6 C

FIG. 6 D

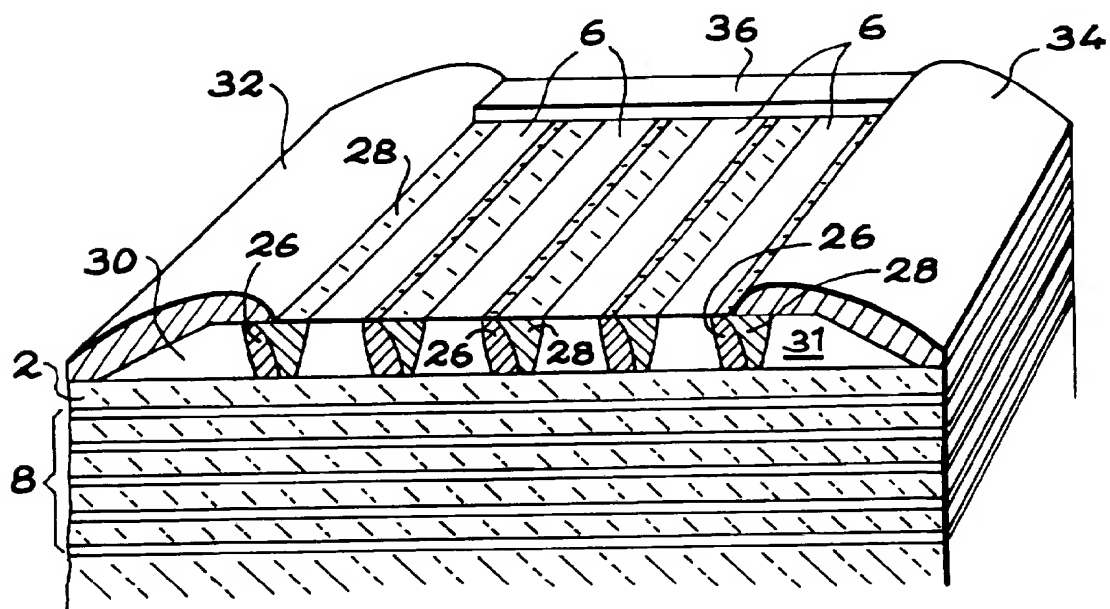


FIG. 7

4/4

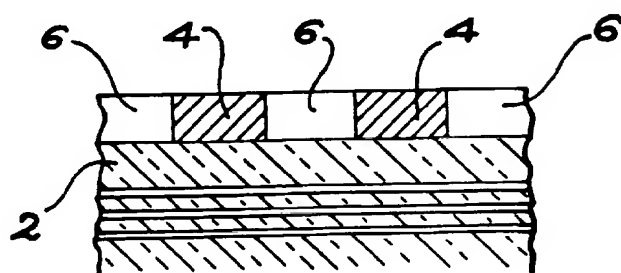


FIG. 6E

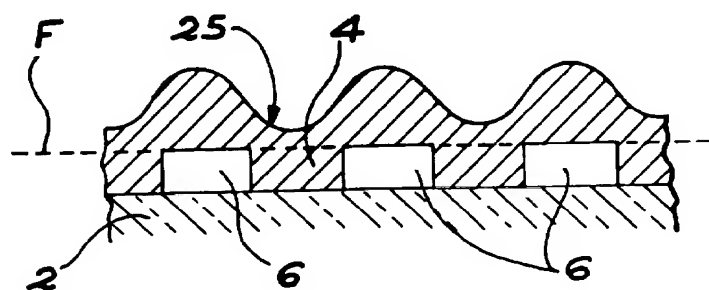


FIG. 6F

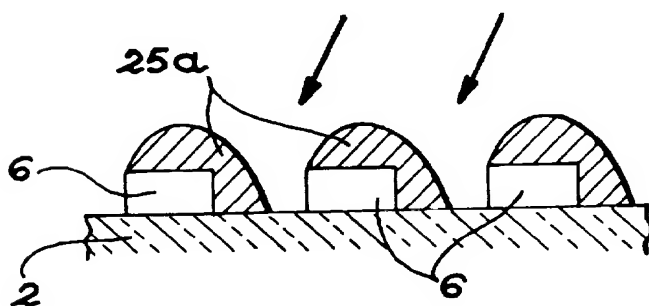


FIG. 6G

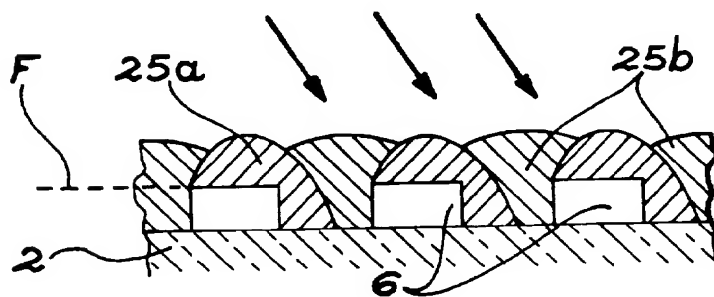


FIG. 6H



# **RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

2803950

N° d'enregistrement  
nationalFA 581765  
FR 0000468

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	CHOU S Y ET AL: "NANOSCALE TERA-HERTZ METAL-SEMICONDUCTOR-METAL PHOTODETECTORS" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS,US,IEEE INC. NEW YORK, vol. 28, no. 10, 1 octobre 1992 (1992-10-01), pages 2358-2368, XP000565156 ISSN: 0018-9197 * le document en entier *	1-3,6, 9-11,15, 17	H01L31/101 H01L31/022 G01J3/00 H04B10/06
A	PRANK U ET AL: "METAL-SEMICONDUCTOR-METAL PHOTODETECTOR WITH INTEGRATED FABRY-PEROT RESONATOR FOR WAVELENGTH DEMULTIPLEXING HIGH BANDWIDTH RECEIVERS" APPLIED PHYSICS LETTERS,US,AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, vol. 62, no. 2, 11 janvier 1993 (1993-01-11), pages 129-130, XP000332226 ISSN: 0003-6951 * le document en entier *	1,3,6, 9-12,14, 15	
A	DABOO C ET AL: "SURFACE-PLASMON-ENHANCED PHOTODETECTION IN PLANAR AU-GAAS SCHOTTKY JUNCTIONS" THIN SOLID FILMS,CH,ELSEVIER-SEQUOIA S.A. LAUSANNE, vol. 189, no. 1, 1 août 1990 (1990-08-01), pages 27-38, XP000151018 ISSN: 0040-6090 * le document en entier *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) H01L
A	US 5 945 720 A (ISHII MASAMI ET AL) 31 août 1999 (1999-08-31) * le document en entier *	1,3, 15-17	
A	GB 2 100 511 A (ROCKWELL INTERNATIONAL CORP) 22 décembre 1982 (1982-12-22) --- -/--		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 octobre 2000		Visentin, A	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
<p>X : particulièrement pertinent à lui seul  Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un  autre document de la même catégorie  A : arrière-plan technologique  O : divulgation non-écrite  P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention  E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure  à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date  de dépôt ou qu'à une date postérieure.  D : cité dans la demande  L : cité pour d'autres raisons  &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



## RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

2803950

N° d'enregistrement  
national

FA 581765

FR 0000468

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	J. MELENDEZ ET AL: "Development of a surface plasmon resonance sensor for commercial applications" SENSORS AND ACTUATORS B,CH,ELSEVIER SEQUOIA S.A., LAUSANNE, vol. 39, no. 1-3, 1 mars 1997 (1997-03-01), pages 375-379, XP004087775 ISSN: 0925-4005		
A	US 5 227 648 A (WOO JONG-CHUN) 13 juillet 1993 (1993-07-13)		
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 octobre 2000		Visentin, A	
<p style="text-align: center;">CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul</p> <p>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie</p> <p>A : arrière-plan technologique</p> <p>O : divulgation non-écrite</p> <p>P : document intercalaire</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention</p> <p>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.</p> <p>D : cité dans la demande</p> <p>L : cité pour d'autres raisons</p> <p>&amp; : membre de la même famille, document correspondant</p> </div> </div>			

 1  
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)